电子加速器光中子源生产医用同位素的模拟研究

张子雄 [1,2] 李凯旋 [1,2] 魏强林 [1,2] 刘义保 [1,2,3] 张勤拓 [1,2]

1（东华理工大学核技术应用教育部工程研究中心 江西 南昌 330013）

2（东华理工大学核科学与工程学院，江西 南昌 330013）

3（江西省核辐射探测及应用工程技术研究中心，江西 南昌 330013）

摘要 光核反应和紧凑型中子源是生产医用同位素的新兴工具，东华理工大学（ECUT）正在建设一种电子加速器驱动的光中子源（ECANS），用于医用同位素生产研究。本文在分析 W- ^{100}Mo 光中子源的中子产额及 ^{99}Mo 产量的基础上，建立了中子能量调节层和中子反射层组成的放射性同位素产生模型，对不同天然氧化物材料（MoO_3、Lu_2O_3、Y_2O_3）进行了放射性同位素的产生模拟及伴生产物分析，探讨了光核反应中子源生产医用同位素的可行性。研究结果显示，在高富集 ^{100}Mo 靶材中 ^{99}Mo 同位素的产量为 54.1 Ci/day，在氧化物靶材中 ^{99}Mo 的产量为 17.4 Ci/day、^{177}Lu 的产量为 18.2 Ci/day 以及 ^{90}Y 的产量为 57.0 Ci/day。此外分析了天然氧化物在辐照条件下放射性杂质的含量，为后续分离纯化提供数据参考。

关键词 光核反应；中子源；电子直线加速器；医用同位素

中图分类号 TL92

DOI:

Simulation study of medical isotope production using electron accelerator-driven photoneutron source

Zhang Zixiong [1,2] Li Kaixuan[1,2] Wei Qianglin[1,2] LIU Yibao [1,2,3] Zhang Qintuo[1,2]

1(*Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education (East China University of Technology), Nanchang, 330013*)

2(*School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang, 330013*)

3(*Engineering Technology Research Center of Nuclear Radiation Detection and Application，Nanchang, 330013)*)

Abstract **[Background]**: Photonuclear reactions and compact neutron sources have emerged as promising tools for the production of medical isotopes, providing alternatives to conventional reactor-based high-enriched uranium methods. East China University of Technology (ECUT) is currently constructing an electron accelerator-driven photoneutron source(ECANS) for medical isotope production research. **[Purpose]**: Investigate the photonuclear reaction with ^{100}Mo isotope and utilize the generated neutrons for isotopic production. **[Methods]**: The study involves analyzing the photonuclear reactions of ^{100}Mo and investigating the neutron spectrum and activation yield of ^{99}Mo within a high purity ^{100}Mo target. Based on this photonuclear source, a new model to produce medical isotopes is established, comprising neutron energy modulation layer and neutron reflection layer. The study calculates the production yields of ^{99}Mo, ^{177}Lu, and ^{90}Y in various natural oxides and assesses the feasibility of using

教育部核技术应用教育部工程研究中心开放基金资助项目（HJSJYB2021-9），东华理工大学博士启动基金资助项目（DHBK2021005），江西省质谱科学与仪器重点实验室开放基金资助项目（JXMS202111） 资助

第一作者：张子雄，男，1999 年出生，2021 年毕业于南京工程学院，现为硕士研究生，研究领域为医用同位素生产。

通讯作者：刘义保，E-mail: ybliu@ecut.edu.cn

收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

Supported by Fund of Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, Ministry of Education (Grant No. HJSJYB2021-9), Doctoral Project of East China University of Technology (Grant No. DHBK2021005) , Jiangxi Key Laboratory for Mass Spectrometry and Instrumentation,East China University of Technology（Grant No. JXMS202111）

First author: ZHANG Zixiong ,male, born in 1999, graduated from Nanjing Institute of Technology in 2021, master student, focusing on medical isotope production

Corresponding author: LIU Yibao, E-mail: ybliu@ecut.edu.cn

photonuclear sources for medical isotope production. **[Results]**: The research results demonstrate that photo-nuclear reactions can effectively produce medical isotopes such as ^{99}Mo, ^{177}Lu, and ^{90}Y, with respective activities of 17.4/day, 18.2 Ci/day, and 57.0 Ci/day. And in the high purity ^{100}Mo target, the daily output of ^{99}Mo reaches 54.1 Ci/day. **[Conclusions]**: The study demonstrates the feasibility of using the photodisintegration reaction of ^{100}Mo as a neutron source for secondary production of medical isotopes. This approach offers the potential to enhance the economic viability of isotope production. The study analyzed the content of radioactive impurities in natural oxides under irradiation conditions, providing preliminary insights for subsequent separation and purification processes. Therefore, this research has certain reference value for the development of tools for radioactive isotope production.

Key words Photonuclear reaction, Neutron source, Electron linear accelerator, Medical isotopes

核医学是现代医学的重要分支，通过放射性同位素可以对疑难杂症，尤其是肿瘤和癌症方面开展有效的诊治[1]。^{99}Mo、^{177}Lu 和 ^{90}Y 是三种常用放射性同位素，在放射性药物中有着广泛的应用。^{99m}Tc 是 ^{99}Mo 的衰变子体，发射 140keV 伽马射线，通常用于 SPECT(单光子发射 X 射线计算机断层扫描)进行各种癌症的诊断，是当前需求量最大的医用同位素之一[2]。^{177}Lu 用于肿瘤和癌症的治疗，半衰期为 6.7 天，发射出 497 keV 的 β 粒子[3]。^{90}Y 用于放射性免疫治疗，是一种体内治疗癌症的手段，半衰期为 64.1 h，发射出 2.28 MeV 的 β 粒子[4]。

放射性医用核素主要是依靠反应堆辐照高浓缩铀进行生产，而随着反应堆的退役以及防核扩散的限制，各国正在积极寻求其他策略来生产医用核素。其中高通量的中子辐照设施对当前和未来新型的放射性医用核素的生产至关重要，尤其是紧凑型中子源不仅能够提供高通量的中子，而且具有小型化、低空间占用的特点，可以在一定程度上替代或补偿反应堆生产[5]。Swami 等人 [6]利用一台 14MeV 的 D-T 中子发生器，研究了 MoO_3、Lu_2O_3 在中子辐射场中的日生产量，可获得 1.14 Ci 的 ^{99}Mo 及 0.3 Ci 的 ^{177}Lu，Masayuki 等人 [7]利用 D-Li 高通量聚变中子源研究天然 MoO_3 在低能中子辐照下的活化情况，辐照两天后获得 27 TBq 的 ^{99}Mo，足以满足日本目前 95%的需求量。此外利用高通量光子与 ^{100}Mo 发生光核反应生产 ^{99}Mo 也是研究热点之一，Tkac 等人 [8]使用 40 MeV 电子加速器对高富集 ^{100}Mo 进行 0.5 h 辐照，获得 1.49 Ci 的 ^{99}Mo。此外高通量光子驱动的光中子源能够在中子产额、运行时间、空间占用以及成本效益之间达成平衡。杨祎罡等人[9]提出一种基于电子直线加速器的中子源系统，使用 50 MeV/50 kW 的电子束轰击钨靶，在中子通道出口处获得了中子通量为 8.125×10^{13} n/s 的中子束流。

目前，光中子转换靶通常为钨/铀，其反应产物难以加以利用，导致成本效益降低。但当 ^{100}Mo 作为光核反应的转换靶时，可将反应产物 ^{99}Mo 用于医学领域当中且放射性核素纯度较高，有利于提高靶材的回收效益，具有较高的研究价值。

本文首先研究了高富集 ^{100}Mo 靶材在光核反应下的中子发射情况及 ^{99}Mo 的产生情况；其次建立了一个光中子辐照模型，该模型由中子能量调节层和中子反射层组成，并基于该模型，计算了在天然氧化物靶材中 ^{99}Mo、^{177}Lu、^{90}Y 的产量及伴生产物。

1 核反应截面

1.1 ^{100}Mo 同位素的光核反应

基于光子产生中子分为两个步骤，第一步是通过钨、钽等高 Z 材料将电子转换成光子。图 1 展示了不同能量的电子束流在 1 mm 厚的钨靶上得到的高能韧致辐射光子谱，在 35 MeV 电子束流轰击时，光子转换率达到 1.817。第二步是将光子转换为中子，生成中子的效率受到光子与原子之间的相互作用的影响。图 2 展示了 ^{100}Mo(γ, n)^{99}Mo 反应截面以及 ^{100}Mo 总的光核反应截面[10]，由反应截面初步估算，光中子的最大反应产率小于 4 %。

当入射光子的能量为 14.5 MeV 时，^{100}Mo(γ, n)^{99}Mo 的反应截面达到最大，此后，随着光子的能量的增加，光核反应截面降低，而光子能量分布受到入射电子能量的影响，可以通过提高入射电子的能量以有效的保证高能光子的产额。光核反应产生中子的光中子截面较小，在电子光子转换效率较高的状态下，可以通过提高电子束电流强度以有效的提高中子产额。

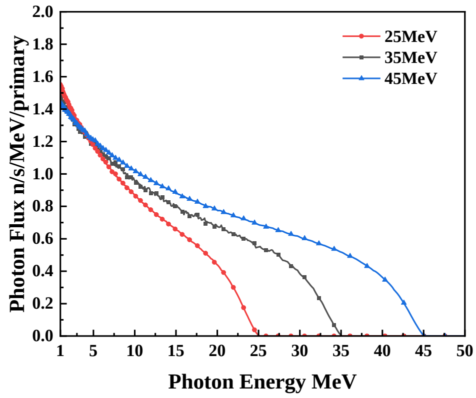


图 1. 钨靶光子能谱

Fig.1 Tungsten target photon energy spectrum

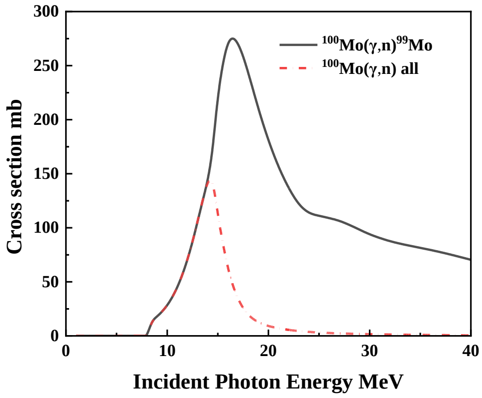


图 2. ^{100}Mo 光核反应截面

Fig.2 The photonuclear reaction cross-section of ^{100}Mo

1.2 中子辐照生产途径及靶材

在中子辐照条件下，^{99}Mo 可以通过两个核反应进行产生，即中子俘获反应 ^{98}Mo(n, γ)^{99}Mo 和中子倍增反应 ^{100}Mo(n, 2n)^{99}Mo[11]。需要注意的是，中子倍增反应需要一定的能量阈值，中子能量必须高于 8 MeV。而中子俘获反应在高于 1 MeV 能量的中子能区，反应截面小于 100 mb，但在 1 keV~100 keV 能量范围及热中子能量范围内有较高的反应截面，可以有效的进行 ^{99}Mo 的产生。

^{177}Lu 可由 ^{176}Lu(n, γ)^{177}Lu 中子俘获反应获得[12]，该反应在热中子能区的反应截面高于 10000 b。在中子源装置当中使用性能良好的慢化剂来调节中子能谱，能够有效的提高 ^{177}Lu 的产量。^{90}Y 同样可以通过中子俘获反应获得，其反应为 ^{89}Y(n, γ)^{90}Y[13]，该反应在 1 MeV 入射中子能量以上时反应截面与 ^{98}Mo 中子俘获截面相近，均低于 100 mb，在热中子能量范围内能够达到 10 b 以上。图 3 展示了以上反应的反应截面，数据来源于 TENDL。

本文选用 MoO_3、Lu_2O_3 和 Y_2O_3 天然氧化物作为中子辐照的靶材。^{98}Mo 是最常见的天然钼同位素，相对丰度为 24.13%，其它钼同位素相对丰度如 ^{100}Mo 为 9.63%，^{97}Mo 为 9.55%，^{96}Mo 为 16.68%，^{95}Mo 为 15.92%，^{94}Mo 为 9.63%，^{92}Mo 为 14.84%。在天然镥中 ^{176}Lu 相对丰度较低，为 2.59%，^{175}Lu 相对丰度为 97.41%。在天然钇中 ^{90}Y 的相对丰度为 100%[14]。

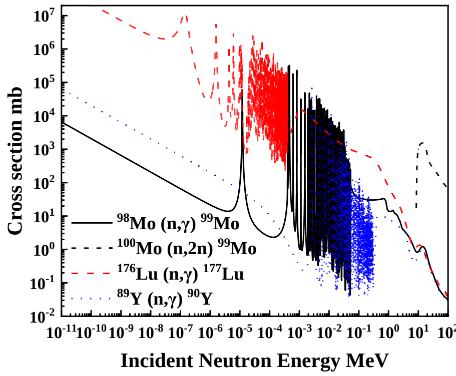


图 3. ^{100}Mo、^{98}Mo、^{176}Lu 以及 ^{89}Y 的反应截面

Fig.3 Cross-sections of ^{100}Mo, ^{98}Mo, ^{176}Lu and ^{89}Y

2 光中子源及辐照模型的初步设计

2.1 光中子源中 ^{99}Mo 及中子产率

利用 Fluka 程序[15]建立如图 4 所示的光中子源模型，即将高富集 ^{100}Mo 圆柱靶放置在壁厚 1mm 的钨容器当中，容器中填充氦气用于散热。

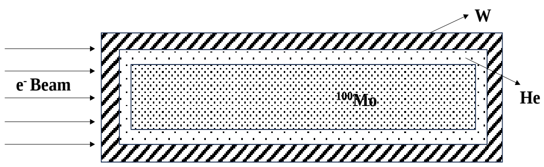


图 4. ^{100}Mo 中子源几何模型

Fig.4 Geometric modeling of ^{100}Mo Neutron source

电子束流参数选自东华中子源直线加速器数据，电子能量为 35MeV、束流强度 2mA。辐照目标靶选用高富集 ^{100}Mo，其核素组成如下：^{100}Mo 为 97.39 %，^{98}Mo 为 2.59 %，Fe 为 540 ppm，Cr 为 64 ppm，W 为 75.1 ppm，Ni 为 39.4 ppm，Cu 为 14.9 ppm，Ge 为 11.4 ppm，Mn 为 5.7 ppm。

^{100}Mo 靶材在电子束流辐照下的中子产额展示在图 5 中，随着辐照目标靶的体积增加，探测到的中子数也随之增加。而光核反应对 ^{100}Mo 的利用率较低，需要对 ^{100}Mo 进行回收才能确保生产的经济性[16]。因此在设计过程中，需要避免将靶件设计得过大，以提高 ^{100}Mo 的回收利用率。

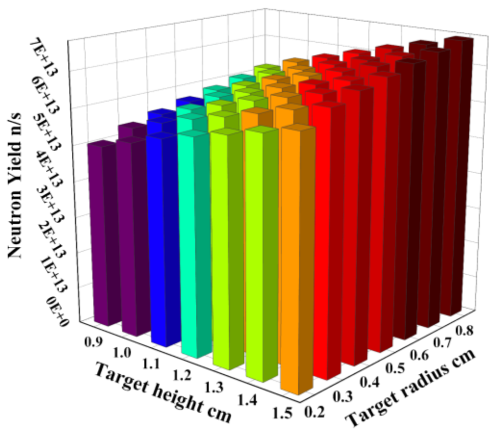


图 5. 不同 ^{100}Mo 尺寸，钨壳表面中子产额

Fig.5 Neutron Flux on the Surface of Tungsten Shell under Various 100Mo Specifications

为获得 ^{99}Mo 在目标靶中的生产分布，使用大尺寸的 ^{100}Mo 靶作为目标靶进行研究，图 6 展示了直径 2 cm、高 3 cm 的 ^{100}Mo 目标靶，在 8 小时的电子辐照及 1 小时冷却衰变后得到的 ^{99}Mo 核素产量分布情况（Y 轴取均值）。结果表明，^{99}Mo 核素主要分布在轴向位置。具有较高 ^{99}Mo 产量的区域（比活度 ＞1.7 Ci/g）呈现出被截断的扁椭圆状，这与韧致辐射产生的光子前向性分布有关，核心区域的 ^{99}Mo 比活度产量可达到 4.5 Ci/g。

为平衡 ^{99}Mo 产量和中子产额之间的关系，将高富集 ^{100}Mo 靶的几何形状设置半径 0.3 厘米，高 1.4 厘米的圆柱体，如图 6 中方框所示。在这种设计下，钨壳表面探测到的中子数达到 6.67×10^{13} n/s。在辐照 24 小时后，总计获得 54.1 Ci 的 ^{99}Mo，比活度为 13.4 Ci/g。图 7 展示了 35 MeV，2 mA 电子束辐照下钨壳表面的中子能谱，中子能量峰值略低于 1 MeV，相比于 D-T 中子源 14 MeV 的中子峰值[17]，更便于进行中子慢化的设计和实现。

确定靶几何尺寸后，如图 8 所示，随着电子束辐照时间的增加，在高富集 ^{100}Mo 中得到的放射性同位素 ^{99}Mo 产量逐渐趋于饱和，产生量和衰减量逐渐达到平衡，因此光中子源采用的高富集 ^{100}Mo 靶最大换靶周期不应超过 10 天。

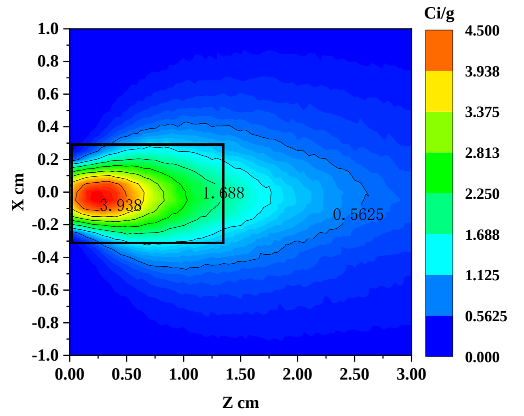


图 6. 8 小时辐照后 ^{99}Mo 同位素活度分布

Fig.6 Distribution of 99Mo isotope activity after 8 h irradiation

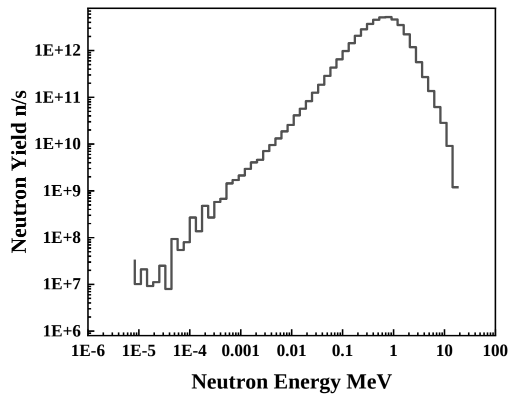


图 7. 钨壳表面中子能谱（靶：R=0.3cm，H=1.4cm）

Fig.7 Neutron energy spectrum on the surface of tungsten shell（Target：R=0.3cm，H=1.4cm）

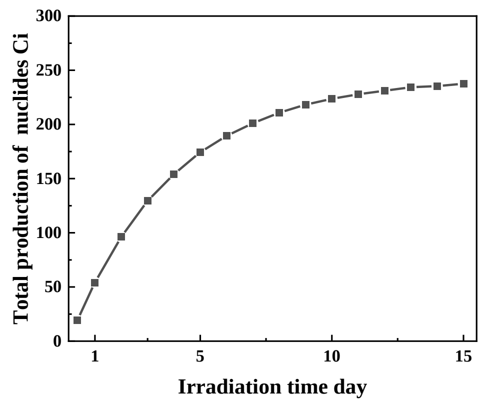


图 8. 不同辐照时间下 ^{99}Mo 同位素的产量

Fig.8 Production of ^{99}Mo at different irradiation times

2.2　光中子辐照模型的建立

在 2.1 中，建立了光核反应中子源的几何模型，获得了中子能量峰值位于 1MeV 的中子束流。然而，根据反应截面的数据，放射性同位素增殖材料在热中子区具有较高的反应截面，而在快中子区反应截面较低。因此，为了提高放射性核素的产生效率，需要使用适当的材料对中子能量进行调节，以增加热中子区的通量。

建立了如图 9 所示中子辐照模型，在中子源周围放置了一个能量调节层，由中子倍增层和慢化层组成，用于调整中子能谱。选用铍作为中子倍增层，仅需 2 厘米厚的铍，就可以显著地提高中子倍增效果[18]。在中子倍增层外侧，放置了聚乙烯材料，用于慢化中能中子和快中子，进而提高医用同位素的产量。此外，在氧化物靶的外侧分布着足够厚的石墨层，用于反射中子，提高中子的利用效率。能量调节层与石墨层之间放置了中子辐照靶材，其几何形状是一个半径为 10 厘米、高 25 厘米的圆柱体，其中左侧挖去了一个半径为 5 厘米、高 17 厘米的圆柱体部分。

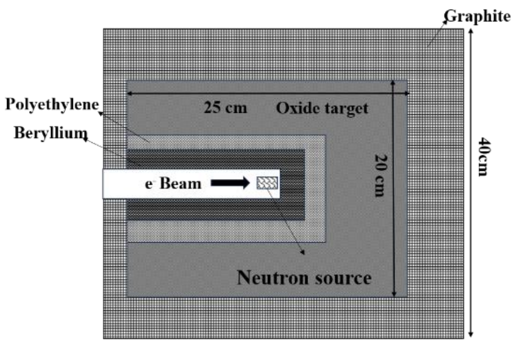


图 9.　光中子辐照生产的几何模型

Fig.9　The Geometric Model for Photoneutron Irradiation Production

图 10 展示了在不同厚度的聚乙烯慢化层下，天然氧化物的放射性活度产量。其中，^{99}Mo 的产量在 7 Ci 上下波动，整体呈现出轻微下降的趋势，这是因为 $^{98}Mo(n, \gamma)^{99}Mo$ 的反应截面在快中子区和热中子区附近有着相近的反应截面，因此中子能量的降低对总产量的影响较小，相反随着聚乙烯厚度增加，不可避免的带来中子数量的降低，进而导致 ^{99}Mo 产量轻微下降。

另一方面，对于 ^{177}Lu、^{90}Y 同位素的生产，在热中子区和快中子区反应截面相差甚大，因此对比 ^{177}Lu、^{90}Y 同位素在布置有 2 厘米厚度的倍增层及慢化层的情况和无能量调节层的两种情况，前者产量比后者增加了 408.55%和 428.69%。

值得注意的是，由于 ^{176}Lu、^{89}Y 的天然丰度不同，^{176}Lu 天然丰度约为 2.59%，而 ^{89}Y 的天然丰度接近 100%，因此子辐照后，从 Y_2O_3 中获得更高的 ^{90}Y 产生量。

图 11 所展示了进入氧化物表面的中子能谱。从图中可以观察到，在热中子区的中子通量有着非常显著的增幅，这表明建立的中子能量调节层，具有良好的中子能量调节能力，满足同位素生产工作的需要。

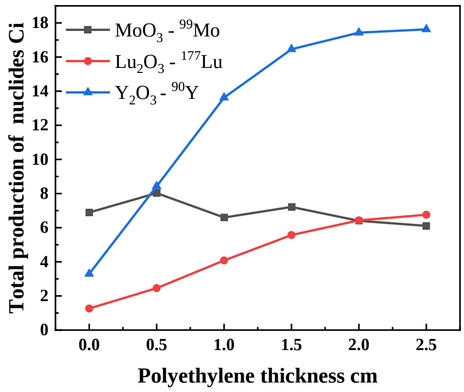


图 10.　同位素活度随慢化层厚度变化

Fig.10　Isotope activity changes with the thickness of the moderated layer

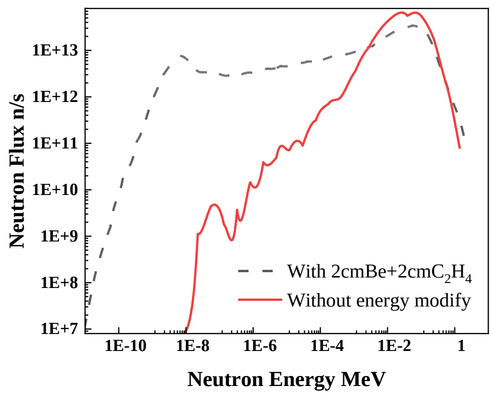


图 11.　慢化层与氧化物接触面的中子能谱

Fig.11　Neutron energy spectrum of the interface between the moderated layer and oxide

3　天然氧化物辐照活化分析

3.1　不同辐照时间下同位素产生总量

在 2.1 和 2.2 中使用 35MeV，2mA 的电子束流辐照高富集 ^{100}Mo 靶，得到了中子产额为 6.67×10^{13} n/s 的光中子源模型，模拟结构也显示能

有效生产医用同位素。然而，电子加速器无法像反应堆一样长时间、满功率的运行 [19]，且本次研究的中子源是基于高富集 ^{100}Mo 的光核反应，随着辐照时间的推进，^{100}Mo 的富集度下降，这可能导致中子通量的降低，甚至辐照产生效率的降低。因此确定合理辐照时长对生产的经济性和加速器安全运行方面至关重要。

使用中子辐照生产模型分别计算三种天然氧化物(MoO_3 - 4.69 g/cm³、Lu_2O_3 - 9.42 g/cm³、Y_2O_3 - 5.03g/cm³)在 8 小时到 15 天不同辐照时长下医用同位素产生情况。图 12 展示了辐照结束及冷却 1 小时后的同位素活度，结果表明在辐照 8 小时后，可分别获得 6.22 Ci 的 ^{177}Lu、6.51 Ci 的 ^{99}Mo 和 17.78 Ci 的 ^{90}Y；辐照 1 天后，可分别获得 17.43 Ci 的 ^{99}Mo 、18.02 Ci 的 ^{177}Lu 和 57.03 Ci 的 ^{90}Y；辐照 15 天后，可分别获得 145.95 Ci 的 ^{177}Lu、78.92 Ci 的 ^{99}Mo 和 259.46 Ci 的 ^{90}Y。

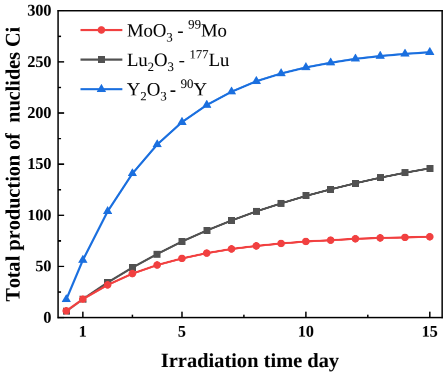


图 12. 不同辐照时间下同位素的产生量

Fig.12 Isotope production at different irradiation times

由于所需的医用同位素半衰期较短，随着放射性同位素总量的累计，生成量和衰变量逐渐达成平衡，增长趋势逐渐减弱，而在辐照初始阶段（8 小时-2 天），产生量呈现出线性增长的趋势。因此在实际生产中需要结合当地放射性同位素的需求量以及加速器运行状态综合考虑辐照时长的设置，最佳辐照时长应小于 2 天，最长辐照时间也不应超过 7 天，辐照时间超过 7 天后，放射性同位素产量增长趋势小，经济性差。

图 13 展示了在 8 小时、1 天和 2 天辐照结束后 ^{177}Lu、^{99}Mo 和 ^{90}Y 放射性同位素活度衰减状况。放射性活度呈现指数衰减，所以辐照后需尽快分离核素。

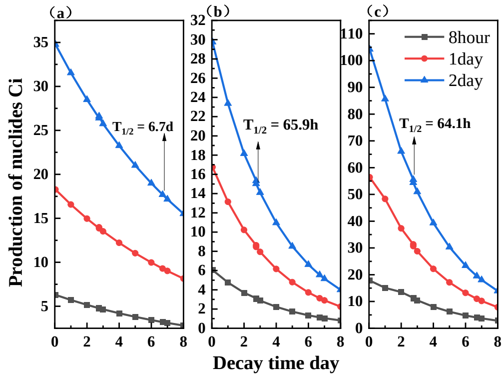


图 13. 辐照结束后(a)^{177}Lu、(b)^{99}Mo、 (c)^{90}Y 同位素的活度变化

Fig.13 The activity change of medical isotopes after irradiation (a)^{177}Lu, (b)^{99}Mo, (c)^{90}Y

3.2 天然氧化物中伴生产物分析

使用高富集 ^{100}Mo 产生的光中子对天然氧化物辐照可有效产生 ^{99}Mo，^{177}Lu 和 ^{90}Y 医用放射性同位素。而由于在天然氧化物中存在 Mo、Lu 和 Y 的多种同位素，会产生一些不适用于核医学的放射性产物。因此在模拟过程中探究这些伴生产物的含量，对后续分离和纯化过程具有重要的意义。

表 1、表 2 和表 3 分别列出了经过 24 小时辐照及 1 小时冷却衰减后在 MoO_3，Lu_2O_3 和 Y_2O_3 天然氧化物中探测到的伴生产物含量。

在 MoO_3 中，主要的伴生产物为 ^{93m}Mo、^{91}Mo、^{90}Mo、^{97}Nb、^{96}Nb、^{95}Nb、^{91m}Nb 和 ^{90}Nb。对于 ^{97}Nb，^{91}MO，^{101}Mo 等同位素，其半衰期较短，无需复杂的处理工艺。然而，对于较长半衰期的 $^{95,96}Nb$ 等同位素，需要采取更多的措施，如可以通过三价铁的共沉淀过程来去除 Zr 和 Nb 等核素 [20]。从表 1 可知，^{95m}Nb，^{91}Nb 等同位素尽管产量相对较低，但仍需去除这些放射性核素，因为这些半衰期时间较长，若不进行处理，可能在后续化学处理流程当中发生累积，造成放化纯度的降低。

在 Lu_2O_3 中，主要的伴生产物有 ^{174}Lu，^{173}Lu，^{174m}Lu，^{176m}Lu 等同位素。这些同位素的化学性质与 ^{177}Lu 相近，且具有较长的半衰期，需要采用高效液相色谱或其他分离技术，将其从溶解靶中分离出来，以确保最终产物的高放化纯度[21]。

在 Y_2O_3 中由于 ^{89}Y 的天然相对丰度接近 100%，放射性伴生产物的种类较少，主要检测到 ^{88}Y，^{87}Y，^{87m}Y 和 ^{87m}Sr 四种放射性核素。在处理工艺中，可以采用离子交换树脂或其他适当的分离方法，将这些杂质核素与 ^{90}Y 有效地分离开来 [22]，以确保最终产物的放射性纯度达到医用标准。

表 1 MoO_3 中的放射性同位素 辐照: 35 MeV，2 mA，24h，衰变时间:1 h

Table 1 The radioisotopes found in natural MoO_3. Irradiation:24 h at 35 MeV and 2 mA. Decay time:1h.

核素 Nuclide	活度 (mCi) Activity	占比 X/^{99}Mo	半衰期 Half-life
^{99}Mo	17432.432	-	65.92 h
^{101}Mo	554.054	3.178%	14.61 m
^{93m}Mo	28378.378	162.791%	6.85 h
^{91}Mo	2116.216	12.140%	15.49 m
^{90}Mo	155.405	0.891%	5.56 h
^{97}Nb	114.595	0.657%	72.10 m
^{96}Nb	117.027	0.671%	23.35 h
^{95}Nb	2.446	0.014%	34.99 d
^{95m}Nb	19.811	0.114%	3.61 d
^{91}Nb	0.196	0.001%	680 y
^{91m}Nb	335.135	1.922%	60.86 d
^{90}Nb	983.784	5.643%	14.6 h
^{95}Zr	0.002	0.094ppm	64.03 d
^{88}Zr	1.327	0.008%	83.4 d

表 2 Lu_2O_3 中的放射性同位素 辐照: 35 MeV，2 mA，24 h，衰变时间:1 h

Table 2 The radioisotopes found in natural Lu_2O_3. Irradiation:24 h at 35 MeV and 2 mA. Decay time:1h.

核素 Nuclide	活度 (mCi) Activity	占比 X/^{177}Lu	半衰期 Half-life
^{177}Lu	18216.216	-	65.92 h
^{174}Lu	278.378	1.528%	3.31 y
^{173}Lu	129.189	0.709%	1.37 y
^{172}Lu	459.459	2.522%	6.70 d
^{172m}Lu	0.033	0.002‰	3.70 m
^{174m}Lu	2345.946	12.878%	142 d
^{176m}Lu	448648.649	2462.908%	3.66 h

表 3 Y_2O_3 中的放射性同位素 辐照: 35 MeV，2 mA，24 h，衰变时间:1h

Table 2 The radioisotopes found in natural Y_2O_3. Irradiation:24 h at 35 MeV and 2 mA. Decay time:1h.

核素 Nuclide	活度 (mCi) Activity	占比 X/^{90}Y	半衰期 Half-life
^{90}Y	57027.027	-	65.92 h
^{88}Y	3.649	6.389%	2559.096 h
^{87}Y	1.430	2.507%	79.80 h
^{87m}Y	3.541	6.209%	13.37 h
^{87m}Sr	0.330	0.578%	2.81 h

4 结语

基于 W-^{100}Mo 光中子源，建立了光中子辐射的放射性同位素生产模型，研究了光中子源生产医用同位素的可行性。光中子源在 35 MeV，2 mA 的电子束流辐照条件下，中子产额可达 6.67×10^{13} n/s，在天然氧化物靶材中可获得 17.43 Ci/day 的 ^{99}Mo、18.21 Ci/day 的 ^{177}Lu 和 57.02 Ci/day 的 ^{90}Y。这表明 ^{100}Mo 光核反应构建的光中子源辐照 Mo、Lu 和 Y 的天然氧化物可以有效产生医用同位素。分析了天然氧化物材料在辐照条件下产生的伴生产物，为后续分离纯化提供了建议。本研究为 ECANS 装置实现科学目标提供了参考，为放射性同位素的生产提供了新的选择。

作者贡献声明 张子雄负责研究的提出及设计、仿真模型的建立和计算、文章的起草和最终版本的修订；李凯旋和张勤拓负责数据的收集整理和模型的验证；魏强林负责计算指导和研究设计；刘义保负责最终版本的修订、项目的监督和办理。

参考文献

1 PEI P, LIU T, SHEN W, et al. Biomaterial-mediated internal radioisotope therapy[J]. Materials Horizons, 2021, 8(5): 1348–1366. DOI:10.1039/D0MH01761B.

2 LEE W W. Clinical Applications of Technetium-99m Quantitative Single-Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography[J]. Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2019, 53(3): 172–181. DOI:10.1007/s13139-019-00588-9.

3 MANENTI S, BONARDI M L, GINI L, et al. Physical optimization of production by deuteron irradiation of high specific activity ^{177g}Lu suitable for radioimmunotherapy[J]. Nuclear Medicine and Biology, 2014, 41(5): 407–409. DOI:10.1016/j.nucmedbio.2014.02.007.

4 NECSOIU D, MORGAN I L, HUPF H, et al. Monte Carlo simulations and experimental studies of yttrium-90 production using a 33MeV linac[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2002, 57(4): 509–515. DOI:10.1016/S0969-8043(02)00125-2.

5 ANDERSON I S, ANDREANI C, CARPENTER J M, et al. Research opportunities with compact accelerator-driven neutron sources[J]. Physics Reports, 2016, 654: 1–58. DOI:10.1016/j.physrep.2016.07.007.

6 SWAMI H L, SAXENA A, VALA S, et al. Neutronic simulation of medical radioisotope

^{99}Mo and ^{177}Lu production in IPR 14 MeV neutron generator facility[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2023, 195: 110743. DOI:10.1016/j.apradiso.2023.110743.

7 OHTA M, KWON S, SATO S, et al. Investigation of Mo-99 radioisotope production by d-Li neutron source[J]. Nuclear Materials and Energy, 2018, 15: 261–266. DOI:10.1016/j.nme.2018.05.017.

8 TKAC P, CHEMERISOV S, GROMOV R, et al. Side-reaction products identified for photo-nuclear production of ^{99}Mo[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, 326(1): 543–553. DOI:10.1007/s10967-020-07307-1.

9 LAI Y, YANG Y. A Design for the High Yield Photoneutron Source Target Station[J]. Materials, 2022, 15(21): 7674. DOI:10.3390/ma15217674.

10 KONING A J, ROCHMAN D, SUBLET J-Ch, et al. TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology[J]. Nuclear Data Sheets, 2019, 155: 1–55. DOI:10.1016/j.nds.2019.01.002.

11 BADWAR S, GHOSH R, LAWRINIANG B M, et al. Measurement of formation cross-section of ^{99}Mo from the ^{98}Mo(n, γ) and ^{100}Mo(n, 2n) reactions[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017, 129: 117–123. DOI:10.1016/j.apradiso.2017.08.019.

12 DVORAKOVA Z, HENKELMANN R, LIN X, et al. Production of ^{177}Lu at the new research reactor FRM-II: Irradiation yield of ^{176}Lu、^{177}Lu [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2008, 66(2): 147–151. DOI:10.1016/j.apradiso.2007.08.013.

13 KRANE K S. The ^{89}Y(n, γ) reaction: Radiative cross sections and the decay of ^{90}Y[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020, 163: 109191. DOI:10.1016/j.apradiso.2020.109191.

14 AUDI G, BERSILLON O, BLACHOT J, et al. The Nubase evaluation of nuclear and decay properties[J]. Nuclear Physics A, 2003, 729(1): 3–128. DOI:10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.

15 AHDIDA C, BOZZATO D, CALZOLARI D, et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code[J]. Frontiers in Physics, 2022, 9: 788253. DOI:10.3389/fphy.2021.788253.

16 王怡, 郭子方, 王兰, 等. 电子加速器生产医用同位素钼-99的发展现状与展望[J]. 同位素, 2022, 35(2): 114–127.
WANG Yi, GUO Zifang, WANG Lan, , et al. The Development Status and Prospects of Medical Isotope Mo-99 Production by Electron Accelerator [J] Isotopes, 2022, 35 (2): 114-127

17 FONNESU N, SCAGLIONE S, SPASSOVSKY I P, et al. On the definition of the deuterium-tritium ion beam parameters for the SORGENTINA-RF fusion neutron source[J]. The European Physical Journal Plus, 2022, 137(10): 1150. DOI:10.1140/epjp/s13360-022-03060-4.

18 朱益楠, 林作康, 卢林远, 等. 基于氘氚中子源硼中子俘获治疗的中子慢化整形研究[J]. 核技术, 2022, 45(1): 31–38.
ZHU Yinan, LIN Zuokang, LU Linyuan, et al. Neutron moderation plastic surgery based on deuterium neutron source boron neutron capture therapy[J]. Nuclear Technology, 2022, 45(1): 31–38.

19 ZHANG Z, SONG M, HUANG X. Optimization method to compensate accelerator performance drifts[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2022, 25(12): 122801. DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.25.122801.

20 TKAC P, ROTSCH D A, STEPINSKI D, et al. Optimization of the Processing of Mo Disks: ANL/NE-15/46[R/OL]. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2016[2023–08–02]. DOI:10.2172/1240156.

21 DASH A, PILLAI M R A, KNAPP F F. Production of 177Lu for Targeted Radionuclide Therapy: Available Options[J]. Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2015, 49(2): 85–107. DOI:10.1007/s13139-014-0315-z.

22 杨子义, 杨宁, 王世真. ^{90}Y-树脂用于放射杀伤的实验研究[J]. 核技术, 1999(11): 701–704.
YANG Ziyi, YANG Ning, WANG Shizhen Experimental study on ^{90}Y resin for radiation killing [J] Nuclear Technology, 1999 (11): 701-704